

プローブ軌跡データと交通流モデルの同化による二次元ネットワークの交通状態推定手法の構築

著者	川崎 洋輔
号	23
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	情博第661号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00122988

氏名（本籍地）	かわさき ようすけ 川崎 洋輔
学 位 の 種 類	博 士（情報科学）
学 位 記 番 号	情 博 第 6 6 1 号
学位授与年月日	平成30年 3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研 究 科、専 攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程） 人間社会情報科学 専攻
学 位 論 文 題 目	プローブ軌跡データと交通流モデルの同化による二次元ネットワークの 交通状態推定手法の構築
論 文 審 査 委 員	（主査）東北大学教 授 桑原 雅夫 東北大学教 授 赤松 隆 東北大学教 授 河野 達仁 東京大学教 授 布施 孝志

論 文 内 容 の 要 旨

第1章 序論

本研究は、プローブデータと交通流モデルの同化による二次元ネットワークのリアルタイムな交通モニタリング手法を提案する。

交通管理では、主要路線や代替路線、その他あらゆる路線の情報を収集し、二次元ネットワーク全体の交通状態をモニタリングした上で、交通制御・情報提供することが重要である。しかし、交通状態モニタリングのためのセンサーデータは、未観測箇所が存在し、かつ観測誤差が含まれる。そこで本研究では、状態空間モデルを構築し、上記課題解決を図った。二次元ネットワークの交通状態推定では、単路部（一次元）と異なり、利用者の経路選択行動のモデル化が必要である。そのため、交通流モデルと経路選択モデルを組み合わせることで二次元ネットワークの交通流を表現するモデルを定式化した。そして、そのモデルにプローブ車両から得られる車両密度と分岐率のデータを同化し、モデルの推定結果を改善する状態空間モデルを構築した。構築した状態空間モデルはプローブデータの観測誤差を考慮して、二次元ネットワークの交通状態を推定する。双子実験により、モデル検証を行い、OD交通量の更新過程や事後分布を分析し、提案モデルの限界と改良方針に関する考察を行った。

第2章 既往研究

本章では、本研究に関連する Kinematic Wave 理論に基づく交通流モデル、一般状態空間モデルの概要について述べるとともに、状態空間モデルを用いた交通状態推定手法に関する既往研究を整理した。最後に、既往研究の課題を踏まえて、本研究の貢献（本研究の位置づけ）を述べた。

本研究の貢献は以下のとおりである。

(1) 新たなプローブ車両の観測値として、プローブ車両分岐率を提案

これまでの研究は、プローブ車両からの観測値として、車両速度や旅行時間を用いてきた。本研究では、モデル内の車両の目的地構成比率の改善に資する新たな観測値として、プローブ車両分岐率を提案した。

(2) 状態空間モデルを一次元から二次元ネットワークに拡張

前節で述べたように既往の状態空間モデルは、一次元ネットワークを対象にしたものである。この理由は、

- ・二次元ネットワークの場合、ドライバーの経路選択を考慮する必要があること
- ・一般道の交差点の交通流は複雑でありモデル化が難しいこと

といった点が推察される。本研究では、これらの課題解決のために、交通流モデルと経路選択モデルを用いて二次元ネットワークの交通流を表現するシステムモデルを構築した。そして、システムモデルの推定結果をプローブ軌跡データから得られる車両密度と分岐率を用いて推定結果を改善する状態空間モデルを構築した。

交通流モデルは、OD交通量”が境界条件のため、一般的には、車両感知器等の車両の全数

が観測可能な設置型のセンシングデータを活用する必要がある。しかし、車両感知器は、設置箇所が限定的(主要道にのみ設置)されているため、観測範囲が限定される。一方、プローブデータは、広範なデータを得られるが、量的な把握不可といった問題がある。本研究では、これらの問題解決のために、観測値とモデル構造を工夫して、対応している。

第3章 二次元ネットワークの交通状態推定モデルの定式化

本章では、交通流モデルとプローブ軌跡データを用いた二次元ネットワークの交通状態推定モデルの定式化を行った。二次元ネットワークの交通流の表現は、交通流モデルの解法の一つである Cell Transmission Model(CTM)を用いた。

まず、一次元モデルを二次元ネットワークに拡張する場合の技術課題を整理した。次に、二次元ネットワークの交通流の表現について述べた。その後、二次元ネットワークの交通状態推定のための状態空間モデルの定式化を行う。最後に、事後分布の確率分布の定式化および事後分布推定の解法を整理した。

第4章 双子実験によるモデル検証

本章では、第3章で定式化した交通状態推定モデルの性能検証を行う。モデル検証は、双子実験の枠組みで実施した。

本検証では、OD需要のパターンが異なる2ケースの検証を行った。検証の結果、モデルの経路選択(分岐率)の改善に寄与すること、ならびに分岐率に車両密度もあわせて評価した方がより経路選択が改善されることがわかった。渋滞推定の観点では、①提案モデルが最も高く、次いで、②車両密度評価となった。これは、車両密度は、渋滞推定精度改善に有効であること、および車両密度と分岐率をあわせて評価した方がより渋滞推定精度が改善され则认为られる。提案モデルの精度が高い理由は、観測分岐率による経路選択と観測車両密度によりセルの車両密度(状態量)の両方が改善されるためと推察される。

第5章 結論

本研究では、状態空間モデルによる二次元ネットワークの交通状態推定手法を提案した。提案したモデルは、双子実験により検証を行った。

今後の課題は以下のとおりである。

- 1) ODパターンの推定精度向上:モデル検証の結果、複数のOD需要を設定したケースにおいて、OD需要分布が真値とモデルで乖離しているため、渋滞推定精度が低い状況が見られた。この乖離の理由は、観測分岐率のみでは、与えている情報量や関数が足りないため、真のOD需要が特定できない(O D需要パターンによっては、同じ分岐率のパターンが複数存在する)と推察される。この問題解決のためには、ODパターンの推定精度向上が課題と考える。本モデルの精度は、OD需要の初期分布の精度に依存する。その理由は、真値と乖離した初期分布を設定しても真の交通状態に近いものは得られないためである。したがって、課題解決のアプローチの一つに精度のよい初期分布の設定が考えられる。初期分布の設定方法としては、例えば、先見的な(過去調査結果等)のOD需要を設定し、真値との乖離を抑止することや、初期分布で生成するOD需要パターン数(パーティクル数)を増やすことが考えられる。ただし、後者の場合、OD需要のパターン数が多くなると、生成するパーティクルの数(OD需要の組み合わせパターン)が膨大になるといった新たな問題が生じるため、その解決策も検討が必要と考える。この他、OD需要をモデル化し、ODの制約を増やすことが考えられる。OD需要のモデル化については、4章で述べたように、起終点ノードの発生・集中交通量の大小と起終点間の距離などの関数としてODを表すようなモデルを本モデルに組み込むことが考えられる。また、OD推定のヒントとなる観測値を追加するといったアプローチも考えられる。
- 2) フィルタリング(事後分布の推定)手法の検討:本研究では、事後分布の算定法として、パーティクルフィルタ⁷⁾を用いている。パーティクルフィルタは、システムモデルや観測モデルが非線形な場合やノイズが非ガウスの場合であっても事後分布を算定可能といった特徴を持つ。しかし、パーティクルフィルタは、少数の粒子の重みだけ大きく、その他の多数の粒子の重みはほとんどゼロになってしまう、所謂、縮退の問題が指摘されている⁸⁾。そのため、今

後は、アンサンブルカルマンフィルタ等、縮退を抑止するようなフィルタリング手法の検討が必要である。

- 3) ドライバーの交通状態の学習過程の定式化：提案したモデルでは、経路選択行動にマルコフ性（一期前のみ経路選択駆動に影響を与える）を仮定して、定式化した。しかしながら、実際の経路選択行動では、一期前よりもさらに前の状態をドライバーが学習し、経路選択を行うことも考えられる。今後は、こうしたドライバーの過去の交通状態の学習過程を定式化することが課題と考える。
- 4) 運転者の経路選択行動のモデル化：提案モデルは経路選択モデルに完全に依存しているため、経路選択モデルが実際の経路選択行動と異なれば、交通状態の推定精度が悪化する。したがって、運転者の経路選択行動のモデル化も課題と考える。あわせて、柔軟な経路選択モデルを仮定して、自己組織化状態空間モデル⁹⁾を構築し、交通状態と経路選択モデルのパラメータを同時に推定することも考えられる。
- 5) 双子実験によるモデル検証の深堀：本研究で提案したモデル検証結果に一般性を持たせるには、ネットワーク形状やOD需要、観測プローブデータ(台数、抽出率)、様々な経路選択行動下でのケースを追加検証することが必要と考える。例えば、追加検証の内容は、下記が考えられる。

- ・ 大規模ネットワークにおけるOD数と分岐率数との関係の検証
- ・ モデルで仮定した経路選択行動とは異なる経路選択が行われているケースにおいて、提案モデルがどの程度交通状態を再現できるのかを検証

また、上記の次のステップとしては、実測データを用いて、適用上の課題抽出および解決策の検討、ならびに実地でのモデルの妥当性検証が必要と考える。実地での検証は、プローブデータが多く得られること、経路選択が発生するネットワークでの適用が望ましい。そのため、実地検証は、首都圏のネットワークでの検証を想定している。

- 6) 従来の動的な交通配分モデルとの関係の議論：ネットワーク交通配分モデルの視点で見ると、提案モデルは、従来の動的な交通配分モデルを状態空間モデルに（確率的に）拡張したものと考えられる。今後は、従来の動的な交通配分モデルと、提案モデルの関係を議論し、提案モデルの位置づけを明確にすべきと考える。

論文審査結果の要旨

本研究は、プローブデータと交通流モデルの同化による二次元ネットワークのリアルタイムな交通モニタリング手法を提案したものである。交通管理を行う上で、現在の交通状態を知ることが不可欠であり、センシングデータを用いて交通状況のモニタリングが行われている。しかし、センシングデータは、対象とする時空間を完全にカバーしているわけではないため、センシングデータがない場所と時間の交通状態を推定することが必要である。本研究では、交通流モデルに近年収集が進みつつあるプローブ車両データを同化させて、対象地域の交通状態をリアルタイムに推定する手法を提案しており、時宜を得ており社会的な有用性が認められる。

第1章と第2章の研究目的および既往研究のレビューでは、平常時だけでなく災害時やイベント時にも適用できる学習データを必要としないリアルタイム交通モニタリングの必要性をまとめている。また、既往研究ではデータ同化による交通モニタリング手法が単路区間に限られており、面的に広がる二次元ネットワークにおける交通モニタリングへの拡張が、交通管理上必要であることを主張している。

第3章では、微小セルから構成されるネットワークを用い、Kinematic Wave 理論に従った交通流モデルに経路選択モデルを組み合わせたシステムモデルと、プローブ車両データによる観測モデルを用いた状態空間モデルを定式化している。本定式化では、プローブ車両の速度から得られる交通密度だけでなくノードにおける分岐率を観測データとして用いることにより、二次元ネットワークで考慮しなければならない OD 交通量の確率分布を、仮定した経路選択モデルと分岐率の関係から更新させている。このような二次元ネットワークに拡張した定式化は、学術的な新規性が認められる。

第4章では、提案手法を仮想ネットワークを用いた双子実験で検証し、ネットワーク規模、経路選択行動などに関連した提案手法の性質を整理するとともに今後の課題についてまとめている。

以上のように本論文は、プローブデータと交通流モデルの同化による二次元ネットワークのリアルタイムな交通モニタリングという、学術的な新規性と社会的な有用性を持つ手法を提案しており、人間社会情報科学ならびに交通管理の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は、博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。